doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.05.06

内蒙古高原等地湖泊表层沉积物孢粉与植被覆盖度定量关系研究①

陈东雪[1,2]， 王 维[1,2]， 刘立娜[1,2]， 姜亚娟[1,2]， 李岩岩[1,2]，
牛志梅[1,2]， 马玉贞[3]， 何 江[1,2]
（1 内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古 呼和浩特 010021；
2 内蒙古大学环境地质研究所，内蒙古 呼和浩特 010021；
3 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室、地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875）

摘　要： 过去植被覆盖度重建在长尺度气候模拟和陆地生态环境演变机制研究等方面具有重要意义。基于现代过程的孢粉—植被覆盖度转换函数研究，可为利用孢粉地层数据重建过去植被覆盖度变化提供一条新的途径。以内蒙古高原等地39个湖泊和7个水库中心的表层沉积物孢粉组合与归一化植被指数（*NDVI*）为研究对象，利用加权平均偏最小二乘法（WA-PLS）、局部加权加权平均法（LWWA）和最佳类比法（MAT）分别建立了孢粉—*NDVI* 转换函数；通过留一交叉检验法、自助法和空间自相关性等检验，筛选出最优模型并应用于古地层孢粉数据，实现定量重建过去植被覆盖度变化。结果表明：MAT 和 WA-PLS 模型均受到空间自相关性的显著影响，而 LWWA 模型则是建立孢粉—*NDVI* 转换函数的最优模型。与已有类似转换函数表现能力的对比表明，本研究建立的转换函数具有较强的可靠性和应用潜力。基于本研究转换函数重建的内蒙古辉腾锡勒（HTL）区域全新世植被覆盖变化与孢粉重建的植被变化具有很好的一致性，进一步印证了本研究转换函数的较强潜力，均表现出对降水变化的响应更为显著。

关 键 词： 内蒙古高原； 湖泊表层沉积物； 孢粉组合； 植被覆盖； 归一化植被指数； 转换函数

地表植被覆盖变化通过地表反照率和温室效应等机制，对地球气候系统能量转化和物质迁移产生重要作用[1-2]。地质历史时期地表植被覆盖变化可为气候模拟提供边界条件，帮助揭示过去气候变化的规律和机制[3]。利用化石孢粉组合数据可有效重建过去地表植被覆盖，而现代孢粉—植被覆盖转换函数关系的研究是利用化石孢粉重建过去植被覆盖的前提和基础，具有重要意义。

随着近几十年来亚洲北方现代孢粉数据的与日俱增，研究者开展了一系列现代孢粉—植被覆盖转换函数关系研究，并定量重建了中国北方区域尺度的植被覆盖[4-7]。然而，已有研究多以表土孢粉为研究对象，然而表土在孢粉源区、沉积过程、保存等方面与湖泊岩芯沉积物差别较大[8-9]；因而将表土孢粉组合的研究成果应用到湖泊沉积物来重建过去植被覆盖变化的工作具有较大的不确定性。湖泊中心表层沉积物孢粉在源区、沉积过程、保存等方面与湖泊岩芯沉积物相似，具有区域代表性[8-10]，其孢粉—植被覆盖转换函数在湖泊岩芯孢粉植被覆盖重建中具有较大潜力。内蒙古高原位于我国北方季风边缘区，现代气候和植被分布变化梯度大[11]，各类型湖泊分布较多，为研究湖泊表层沉积物孢粉—植被覆盖转换函数提供了可能。

利用遥感技术能够快速、大范围的获取植被光谱信息，建立与植被覆盖度的定量关系，用于指示植被变化[12]。归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，*NDVI*）等于近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上两者之和，即（*NIR* －

① **收稿日期：** 2019－01－09； **修订日期：** 2019－04－25
基金项目： 国家自然科学基金（41562009，41962011，41330748）；内蒙古自治区草原英才项目（CYYC7004）
作者简介： 陈东雪，女，硕士研究生. E-mail：ChenDX394894426@163.com
通讯作者： 王维，男，博士，副教授. E-mail：ndweiwang@imu.edu.cn

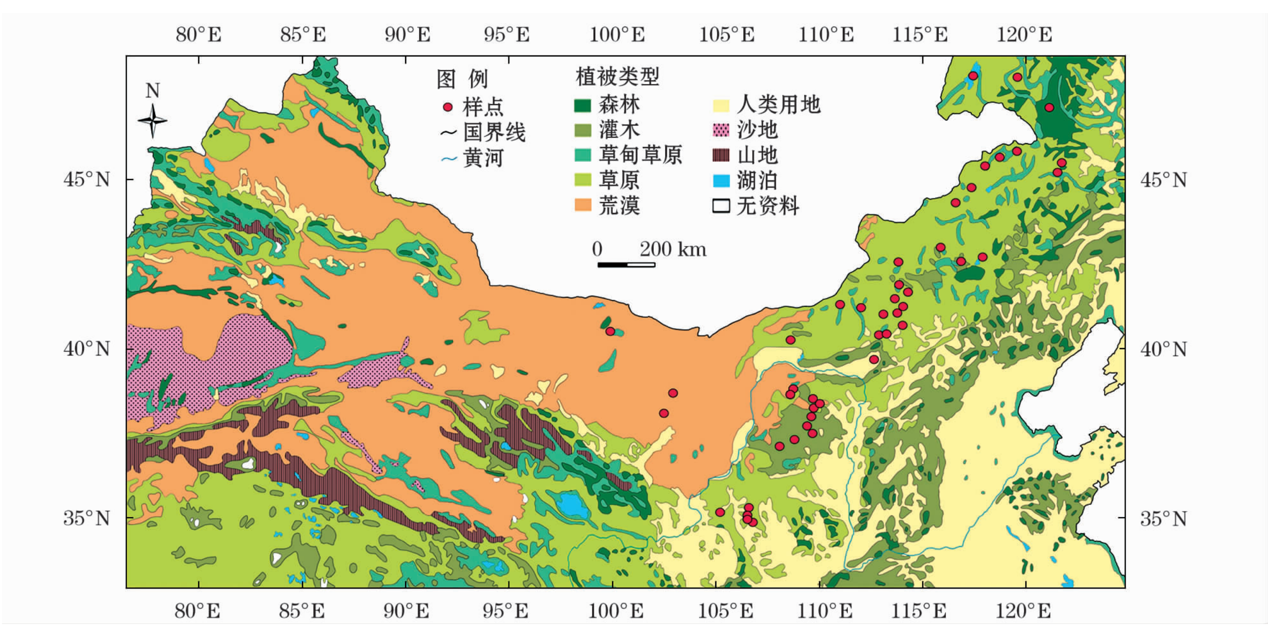
$R)/(NIR+R)$，其中 NIR 为近红外波段的反射值，R 为红光波段的反射值[13]，具有削弱大气辐射和交叉辐射影响、对植被生长变化响应敏感、准确反映植被变化等优点[14-15]。CHOUDHURY 等[16] 和 GILLIES 等[17] 对植被覆盖度和 *NDVI* 关系的研究也表明 *NDVI*能够准确地指示植被覆盖度。但是，*NDVI* 数据获取会受云、气溶胶、太阳高度角和地物二向反射等因素的影响[18-19]，GIMMS *NDVI*（以下简称*NDVI*）数据充分考虑了上述因素影响并进行了修正，能够准确地反应植被覆盖度[20]。因此，本文选取荷兰皇家气象研究所空间分辨率为 0.22°×0.22°的 *NDVI* 指数，代表植被覆盖度。

本文利用内蒙古高原及黄土高原分布的 39 个天然湖泊和 7 个水库中心表层沉积物孢粉百分比数据，结合归一化植被指数（*NDVI*），使用多种方法建立孢粉—*NDVI* 转换函数，检验并评价其表现能力和应用潜力，确定最优模型并应用于古地层孢粉数据，定量重建内蒙古中部辉腾锡勒地区全新世 *NDVI* 的变化序列。

1 研究区概况

研究区位于我国北方干旱半干旱区（101°58′～121°20′E，36°66′～47°70′N），跨越内蒙古高原及其邻近的宁夏回族自治区的黄土高原部分地区。研究区现代气候受亚洲冬、夏季风影响，属典型温带大陆性气候，冬季寒冷干燥，夏季温暖并伴有降水。年降水量自东向西逐渐减少，变化范围为 50～450 mm，呈显著干湿度地带性。年均温自南向北递减，变化范围为 0～8 ℃，呈显著地带性[21]。

受气候条件控制，研究区植被自西向东呈荒漠、荒漠草原、典型草原、草甸草原、森林草原和森林分布，*NDVI* 指数也呈增加趋势。此处 *NDVI* 指数及下文 *NDVI* 平均值的原始数据均来源于荷兰皇家气象研究所数据共享网站（http://climexp.knmi.nl）的 1981 年 7 月～2006 年 12 月的逐月平均 *NDVI* 数据集。本研究中 3 个样点位于荒漠，其植被类型主要为红砂（*Reaumuria songarica*）荒漠、西伯利亚白刺（*Nitraria sibirica*）荒漠、合头草（*Sympegma regelii*）沙漠，*NDVI* 平均值为 0.07［*NDVI* 平均值算法为 26 a 的植物生长季（4～11 月）月平均值之和的平均值］；6 个样点位于荒漠草原，植被类型为戈壁针茅（*Stipa tianschanica*）草原和沙蒿（*Artemisia deserto-rum*）—禾草草原，*NDVI* 平均值为 0.14；26 个样点位于典型草原，植被类型有西北针茅（*Stipa sareptana*）草原、沙蒿—禾草草原、冷蒿（*Artemisia frigida*）—丛生小禾草草原、短花针茅（*Stipa breviflora*）草原、羊草（*Leymus chinensis*）—丛生禾草草原、大针茅（*Stipa grandis*）草原，*NDVI*平均值为0.23；2个样点位于草



注：本植被图引自《中国植被图集》[22]，未区分森林草原和荒漠草原，本文样点植被类型（表 1）划分依据野外调查记录

图 1 研究区植被概况及样点分布位置图

Fig. 1 Vegetation overview and sample location map of the study area

表 1 采样点位置及区域植被类型

Tab. 1 Location and surrounding vegetation types of lake surface pollen samples

样点代码	经度 / °E	纬度 / °N	海拔 /m	植被类型	来源
MOON	120.88	47.51	1 190	森林	未出版数据
DH	112.68	40.58	1 219	森林草原	本研究
LHHLHG*	121.47	45.13	291	森林草原	本研究
LXZ	119.32	47.70	848	森林草原	本研究
LZGST	116.25	42.61	1 358	森林草原	本研究
TSK*	106.11	35.50	2 111	森林草原	本研究
ZSK*	106.07	35.55	2 034	森林草原	本研究
LST*	121.20	45.82	461	森林草原	本研究
LJX*	106.10	35.56	2 086	森林草原	本研究
HTL	112.66	41.08	1 983	草甸草原	本研究
HTLL	112.65	41.11	1 985	草甸草原	本研究
LDW	118.92	46.61	908	典型草原	本研究
BJLP	109.31	39.79	1 365	典型草原	本研究
Dali	116.67	43.29	1 228	典型草原	本研究
Hulun	117.58	49.08	541	典型草原	本研究
BYH	113.16	41.49	1 402	典型草原	本研究
HTLP	109.36	39.42	1 309	典型草原	本研究
LHGNE	112.96	41.49	1 523	典型草原	本研究
CG	115.01	43.44	1 013	典型草原	本研究
DBYHLP	112.94	41.25	1 616	典型草原	本研究
HDLP	109.34	39.52	1 320	典型草原	本研究
Hongjian	109.90	39.10	1 220	典型草原	本研究
KTLP	109.11	39.38	1 334	典型草原	本研究
LBLG	115.87	44.25	938	典型草原	本研究
LDW	116.96	45.46	822	典型草原	本研究
LDW	118.44	46.28	865	典型草原	本研究
LHY	105.26	36.67	1 981	典型草原	本研究
LSNTY	113.03	42.17	1 275	典型草原	本研究
LSNTYQ	112.69	42.72	1 093	典型草原	本研究
LTYS	106.62	37.45	1 337	典型草原	本研究
LWLNE	114.76	43.75	1 147	典型草原	本研究
WLHSLP	113.26	41.52	1 403	典型草原	本研究
XHZ	113.10	41.25	1 641	典型草原	本研究
ZH*	105.45	35.84	1 846	典型草原	本研究
LYC	106.98	37.74	1 380	典型草原	本研究
YHLP	109.32	39.58	1 336	典型草原	本研究
LHJRY	113.14	43.35	937	典型草原	本研究
LDM	109.90	42.35	1 102	荒漠草原	本研究
WLTRMLP	108.44	39.94	1 238	荒漠草原	本研究
LSNZ	112.08	44.30	1 021	荒漠草原	本研究
HTYLP	108.59	39.13	1 407	荒漠草原	本研究
LDMT	110.69	41.70	1 483	荒漠草原	本研究
LWH*	106.61	41.28	1 852	荒漠草原	本研究
LAY	103.63	39.87	1 493	荒漠植被	本研究
LYBL	102.79	39.41	1 229	荒漠植被	本研究
LTEH	101.58	42.01	890	荒漠植被	本研究

注:加 * 样点为水库

甸草原,植被类型为小糠草(*Agrostis alba*)—野大麦(*Hordeum spontaneum*)草甸草原和羊茅(*Festuca ovina*)蒿类杂草,*NDVI* 平均值为 0.37;8 个样点位于森林草原,植被类型有蒙古栎(*Quercus mongolica*)林、山杨(*Populus davidiana*)林、樟子松(*Pinus sylvestris*)林、山荆子(*Malus baccata*)—稠李(*Prunus padus*)灌丛、榆(*Pinus sylvestris*)疏林和长芒草(*Stipa bungeana*)草原,*NDVI* 平均值为 0.39;1 个样点位于森林,植被类型为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林,伴生植被有春榆(*Ulmus pumila*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、核桃楸(*Juglans mandshurica*)林,*NDVI* 平均值为 0.49。

2 研究方法

2.1 样品采集与实验方法

人类影响指数(*HII*)是表征人类活动影响的量化指标[23]。为减少人类活动对本研究的影响,本文使用空间分辨率为 1 km × 1 km 的全球 *HII* 数据集[23-24],筛选区域 *HII* 值小于 22 即受人类活动影响较小[25]的湖泊(样点)作为本文研究对象。此外,湖泊(或水库)的选取还满足以下条件:面积大于 5 hm^2;采样时或上一个雨季湖泊处于未干涸状态。最终,本研究选取了 46 个湖泊(或水库)作为研究对象,其中仅 1 个湖泊采样时干涸,但上一个雨季并未干涸。

2010—2012 年春季和夏季,我们开展了现代花粉样品单的野外采集工作。我们尽量选取靠近湖泊中心的位置,利用 Hydrobios 437—400 湖泊沉积物采样器采集从湖底往下 30 ~ 50 cm 长度的短柱岩芯;之后垂直推出岩芯,采集其顶部 2 cm 来代表近 20 ~ 30 a 的现代沉积物[26-27];并记录下 GPS 标定的采样点经纬度位置信息和 Secchi 圆盘测得的水深数据。最后将所有湖泊表层沉积物样品密封于聚乙烯塑料袋,保存于 −24 ℃ 恒温冰柜中,以备实验所用。

孢粉提取实验采用酸碱法结合筛滤法[28]:首先加入 10% Na_2CO_3 碱液煮沸去除有机质,离心后再加入 5% HCL 去除碳酸盐类杂质;其次洗至中性后加 HF 去除硅质再洗至中性,接着使用 1:9 浓硫酸:乙酸酐混合液水浴处理 9 min,然后经过 7 μm 筛超声波震荡,转至小指管;最后以叔丁醇脱水后加入硅油,制片于 400 倍生物显微镜下鉴定。鉴定参照正

式出版的图版、手册[29-31]进行，鉴定单样陆生植物孢粉数量统计需在500粒以上。以陆生孢粉种属数量总和为基数，分别计算各孢粉种属百分比。

2.2 *NDVI* 数据

本文*NDVI*数据来源于荷兰皇家气象研究所数据共享网站(http://climexp.knmi.nl)的1981年7月~2006年12月的逐月平均*NDVI*数据集，空间数据分辨率0.22°×0.22°。根据研究区植物生长时间[32]，本文选择4~11月*NDVI*逐月平均数据，计算获取了26 a *NDVI*的平均值。

2.3 排序分析

使用排序分析研究湖泊表层沉积物孢粉组合空间分布与主要影响因素的关系。本文选取的主要影响因素包括年均温(*TANN*)、年均降水量(*PANN*)和归一化植被指数(*NDVI*)。具体分析步骤为，首先对含量大于0.5%的孢粉种属进行除趋势分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)[33]，依据其第一排序轴的梯度长度判定数据类型(线性或单峰)，选择冗余分析(Redundancy Analysis, RDA；线性数据)或典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA；单峰数据)对孢粉种属百分比数据和影响因素数据进行分析，揭示其间可能存在的关系。分析使用Canoco 4.5软件进行。

2.4 孢粉—*NDVI* 转换函数的建立与评价

采用C2 1.5.1软件[34]中的加权平均偏最小二乘法(WA-PLS)、局部加权加权平均法(LWWA)和最佳类比法(MAT)3种方法建立孢粉—*NDVI*转换函数。转换函数的评价分以下3个方面进行。首先，使用留一交叉检验法评价模型的预测能力，即比较各模型*NDVI*预测值与观测值的决定系数(R^2_{jack})、预测均方根误差(Root Mean Squared Error of Prediction, *RMSEP*)、最大偏差($MAX\text{-}bias_{jack}$)，评价模型的表现和预测能力。其次，利用自助法[35](Bootstrapping)比较R^2_{boot}值和$MAX\text{-}bias_{boot}$值再次检验模型。最后，由于MAT和WA-PLS法建立的转换函数常受空间自相关性的影响[36]，故采用Palaeosig 1.1-2程序包[37]检验MAT和WA-PLS模型的空间自相关性，评价模型预测能力，确定最优转换函数模型。

3 结果分析

3.1 孢粉组合特征

内蒙古高原等地湖泊表层沉积物孢粉样品共鉴定出68个孢粉种属类型，主要孢粉类型有松属(*Pinus*)、落叶松属(*Larix*)、云杉属(*Picea*)、桦木属(*Betula*)、栎属(*Quercus*)、榆属(*Ulmus*)、蒿属(*Artemisia*)、禾本科(Poaceae)、藜科(Amaranthaceae)、白刺属(*Nitraria*)、莎草科(Cyperaceae)等，其它孢粉类型有桤木属(*Alnus*)、胡桃属(*Juglans*)、柳属(*Salix*)、蒲公英型菊科(Taraxacum-type)、紫菀型菊科(Aster-type)、春黄菊型菊科(Anthemis-type)、蔷薇科(Rosaceae)、柽柳科(Tamaricaeae)、十字花科(Brassicaceae)、唇形科(Lamiaceae)、蓼属(*Polygnoum*)、木樨科(Oleaceae)、唐松草属(*Thalictrum*)、沙棘属(*Hippophae*)、麻黄属(*Ephedra*)等。各植被类型孢粉组合特征显著，孢粉组合基本上可以区分植被类型。各植被类型孢粉组合特征如下(图2)。

3.1.1 荒漠植被 荒漠地区湖泊中心表层沉积物样品共3个，对应样点区域*NDVI*指数变化于

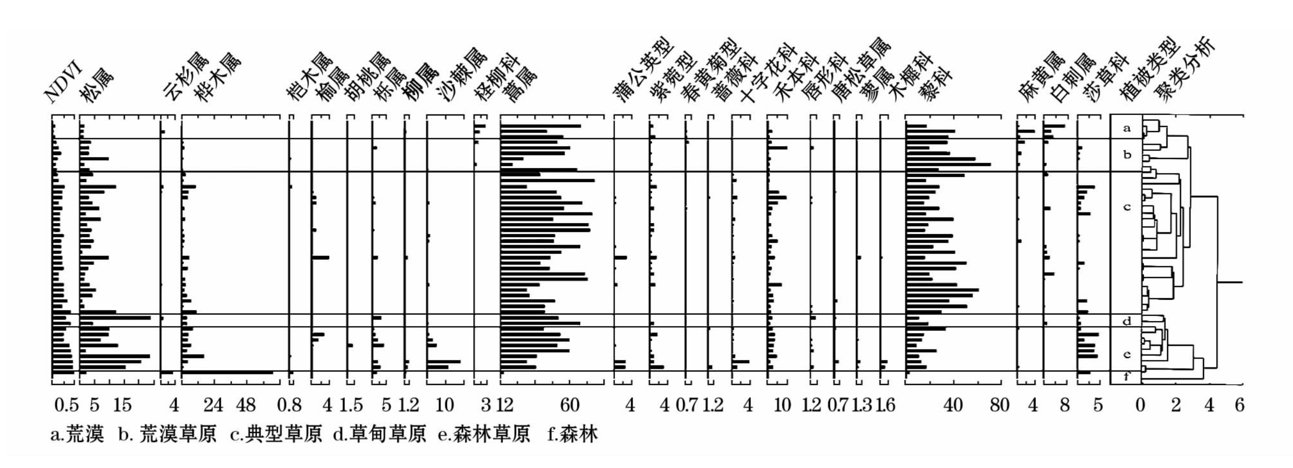


图2 内蒙古高原等地湖泊中心表层沉积物孢粉百分比图谱

Fig. 2 Pollen percentage plot of lake central surface sediment in Inner Mongolia plateau and adjacent area

0.05~0.08 之间,平均值为 0.07。孢粉组合以蒿属(平均值为 56.0%,以下孢粉类型后括弧内数字均为平均值)和藜科(31.2%)为主,其次为松属(1.4%)、白刺属(4.4%)、麻黄属(1.8%)、禾本科(1.1%)等,偶见桦木属、桤木属、榆属、蒲公英型菊科、紫菀型菊科、春黄菊型菊科、蔷薇科、禾本科、莎草科等平均含量低于 1%。

3.1.2 荒漠草原 荒漠草原地区湖泊中心表层样品共 6 个,对应样点区域 *NDVI* 指数变化于 0.10~0.21 之间,平均值为 0.14。孢粉组合最大特点是蒿属(47.3%)和藜科(41.0%)之和为所有植被类型最高值,松属(4.1%)、桦木属(1.1%)和禾本科(2.5%)含量较低,白刺属(0.5%)和麻黄属(0.7%)含量较荒漠地带显著降低,偶见木樨科、榆属、胡桃属、柳属、栎属、蒲公英型菊科、紫菀型菊科、春黄菊型菊科、十字花科、唇形科、蓼属、沙棘属、莎草科等。

3.1.3 典型草原 典型草原地区湖泊表层样品共 26 个,对应样点区域 *NDVI* 指数变化于 0.14~0.41 之间,平均值为 0.23。孢粉组合中蒿属(53.3%)含量较高,藜科(32.0%)含量显著降低,松属(4.5%)和桦木属(3.0%)含量略有增加,云杉属、木樨科、柽柳科、桤木属、榆属、胡桃属、柳属、栎属、蒲公英型菊科、紫菀型菊科、春黄菊型菊科、蔷薇科、十字花科、唇形科、唐松草属、蓼属、沙棘属、麻黄属、白刺属、莎草科等平均含量低于 1%。

3.1.4 草甸草原 草甸草原地区湖泊表层样品共 2 个,对应样点区域 *NDVI* 指数变化于 0.31~0.43 之间,平均值为 0.37。孢粉组合仍以蒿属(60.0%)和藜科(14.3%)为主,乔木类松属(14.2%)、桦木属(3.8%)、栎属(2.1%)等含量增加,湿生草本类莎草科(0.8%)含量升高,杂类草孢粉类型数量增加,云杉属、木樨科、榆属、蒲公英型菊科、紫菀型菊科、蔷薇科、唇形科、唐松草属、麻黄属、白刺属等平均含量低于 1%。

3.1.5 森林草原 森林草原地区湖泊表层样品共 8 个,对应样点区域 *NDVI* 指数变化于 0.26~0.48 之间,平均值为 0.39。孢粉组合最大的特征是乔木类孢粉含量显著升高,以松属(12.7%)、桦木属(6.3%)、栎属(1.7%)为主,灌木类沙棘属(4.8%)含量达最高值,蒿属(46.5%)和藜科(17.0%)含量略有降低但仍占据主导地位,莎草科(2.4%)和禾本科(2.9%)含量达最高,其它种属含量变化不大。

3.1.6 森林 森林地区湖泊表层样品仅 1 个,对应样点区域 *NDVI* 值为 0.49。本样点孢粉组合以桦木属(66.8%)和蒿属(14.4%)为主,落叶松属(2.1%)、云杉属(1.5%)、莎草科(2.8%)、藜科(2.6%)、松属(2.2%)、栎属(1.5%)次之,偶见桤木属、榆属、胡桃科、柳属、紫菀型菊科、蔷薇科、唐松草属等。

3.2 排序分析

对所有样品孢粉组合中含量大于 0.5% 的种属进行除趋势对应分析(DCA),结果表明(表 2)第 1 排序轴的梯度长度为 2.047,小于 3,指示了线性数据类型,因此采用冗余分析(RDA)揭示孢粉组合空间分布特征与影响因素的关系[38]。

RDA 分析结果表明(表 3),4 个排序轴特征值分别为 0.195、0.081、0.029、0.222,前两轴孢粉种属与影响因子的相关系数分别达 0.796 和 0.654,解释种属百分比变化的累计贡献率达 27.6%。因此,利用第 1、2 排序轴进行 RDA 分析(图 3)。图 3 显示 *NDVI* 指向第 1 轴正向,与松属、桦木属等乔木孢粉夹角最小,与白刺属、麻黄属、柽柳科等荒漠孢粉类型夹角近 180°,森林草原和森林样点多分布于第 1 轴正向,荒漠和荒漠草原样点多分布于第 1 轴负向,表明*NDVI*指数与孢粉空间分布关系紧密,是

表 2 湖泊中心表层沉积物孢粉组合除趋势对应分析(DCA)结果

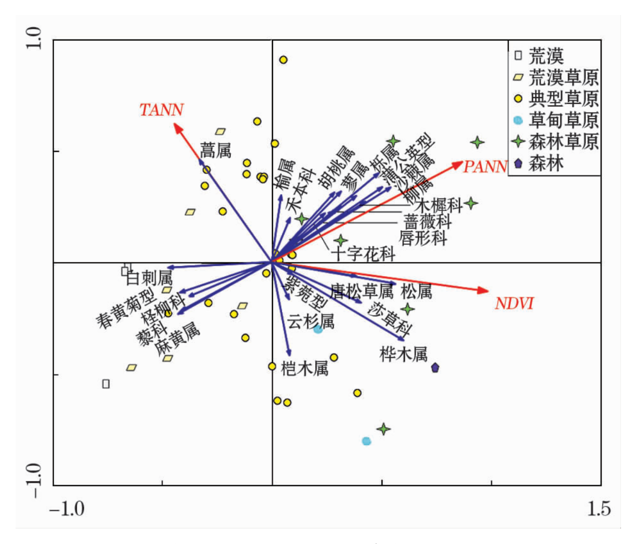
Tab.2 Detrended correspondence analysis (DCA) of pollen assemblage of lake central surface sediment

	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总惯量
特征值	0.259	0.083	0.041	0.019	0.699
梯度长度	2.047	1.208	1.659	0.792	
物种累积百分比变化率	37.0%	49.0%	54.8%	57.5%	
典型特征值的总和					0.699

表 3 湖泊中心表层沉积物孢粉组合与影响因子冗余分析(RDA)结果

Tab.3 Redundancy analysis (RDA) of pollen assemblage of lake central surface sediment and influencing factors

	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总惯量
特征值	0.195	0.081	0.029	0.222	1.000
物种与环境相关性	0.796	0.654	0.652	0.000	
物种累积百分比变化率	19.5%	27.6%	30.4%	52.6%	
典型特征值的总和					1.000



注：*TANN* 为年均温，*PANN* 为年均降水量，*NDVI* 为归一化植被指数。下同

图 3　湖泊中心表层沉积物孢粉组合与影响因素冗余分析（RDA）图

Fig. 3　Plot showing the redundancy analysis (RDA) of pollen assemblage of lake central surface sediment and influencing factors

决定孢粉空间分布最重要因子，为本文构建孢粉—*NDVI* 转换函数提供了依据。

3.3　转换函数的建立及检验

应用 C2 程序中 WA-PLS、MAT 和 LWWA 3 种方法分别建立了现代孢粉—*NDVI* 转换函数并进行了相应检验。留一法交叉验证和自助法[35]检验结果表明（表 4），LWWA_Inv 模型留一交叉检验结果中 R^2_{jack} 达 0.57，$MAX\text{-}bias_{jack}$ 达 0.13，*RMSEP* 达 0.08，其自助法检验结果 R^2_{boot} 达 0.57；WA-PLS-3（WA-PLS Component 3）模型留一交叉检验结果中 R^2_{jack} 达 0.56，$MAX\text{-}bias_{jack}$ 达 0.11，*RMSEP* 达 0.07，其自助法检验结果 R^2_{boot} 达 0.54；MAT 模型留一交叉验证法检验结果 R^2_{jack} 达 0.53，*RMSEP* 为 0.16，$MAX\text{-}bias_{jack}$ 为 0.08，其自助法 R^2_{boot} 为 0.58。综上，LWWA 和 WA-PLS-3 模型相比 MAT 模型具有较好的表现。

对 3 种模型构建的转换函数的 *NDVI* 观测值和预测值以及残差散点图的分析结果表明（图 4），LWWA 和 WA-PLS 模型 *NDVI* 预测值与观测值线性关系较好，线性拟合决定系数（R^2）分别达 0.72 和 0.77，残差主要分布范围在 -0.1 ~ 0.1，表明模型的预测值与观测值拟合效果较好；MAT 模型预测值与观测值线性关系较差，线性拟合决定系数（R^2）为 0.53，残差分布范围在 -0.3 ~ 0.1 之间，拟合效果较差。综上，本研究 MAT 模型不适合建立孢粉—*NDVI* 转换函数，这可能归因于数据训练集样点较少，不能发挥最佳类比法的优点找到最为近似的类比[39]。

MAT 模型和 WA-PLS 模型的预测能力常受到空间自相关性的影响，而 LWWA 模型因其算法预测能力不受空间自相关性影响[40]。为进一步从 LWWA_Inv 和 WA-PLS-3 中选出最优模型，本文采用 palaeosig 程序包[37]检验 MAT 和 WA-PLS-3 模型的空间自相关性。结果如图所示（图 5），当删除样点个数相同时，两个模型中删除地理位置样点与删除环境因子相近样点相比，R^2 值均显著降低，表明 MAT 模型和 WA-PLS 模型均受空间自相关性影响较大，不适用于孢粉—*NDVI* 转换函数的建立。

综上，本研究检验评价结果表明 LWWA_Inv 模型综合表现较好，适合应用于地层化石孢粉重建过去 *NDVI* 变化。

表 4　不同模型效果检验结果

Tab. 4　Performance test results of different models

方法	普通检验			留一交叉检验			自助法检验		
	R^2	*MAX-bias*	*RMSE*	R^2_{jack}	$MAX\text{-}bias_{jack}$	*RMSEP*	R^2_{boot}	$MAX\text{-}bias_{boot}$	*RMSEP*
WA-PLS Component 1	0.64	0.12	0.07	0.52	0.13	0.08	0.52	0.14	0.08
WA-PLS Component 2	0.73	0.08	0.06	0.56	0.12	0.07	0.54	0.12	0.08
WA-PLS Component 3	0.77	0.07	0.05	0.56	0.11	0.07	0.54	0.12	0.09
MAT	0.48	0.17	0.09	0.48	0.17	0.09	0.56	0.16	0.09
WMAT	0.53	0.16	0.08	0.53	0.16	0.08	0.58	0.15	0.09
LWWA_Inv	0.72	0.11	0.06	0.57	0.13	0.08	0.57	0.13	0.08
LWWA_Cla	0.69	0.25	0.11	0.52	0.34	0.14	0.54	0.19	0.13

注：WA-PLS Component 1（第一组分）为普通的加权平均法，WA-PLS Component 2（第二组分）是对第一组分剩余残差优化后的加权平均法，WA-PLS Component 3（第三组分）是对第二组分剩余残差优化后的加权平均法，MAT 为计算过程中取平均值的最佳类比法，WMAT 为计算过程中取加权平均值的最佳类比法，LWWA_Inv 为局部加权平均法的反向回归，LWWA_Cla 为局部加权平均法的典型回归。下同

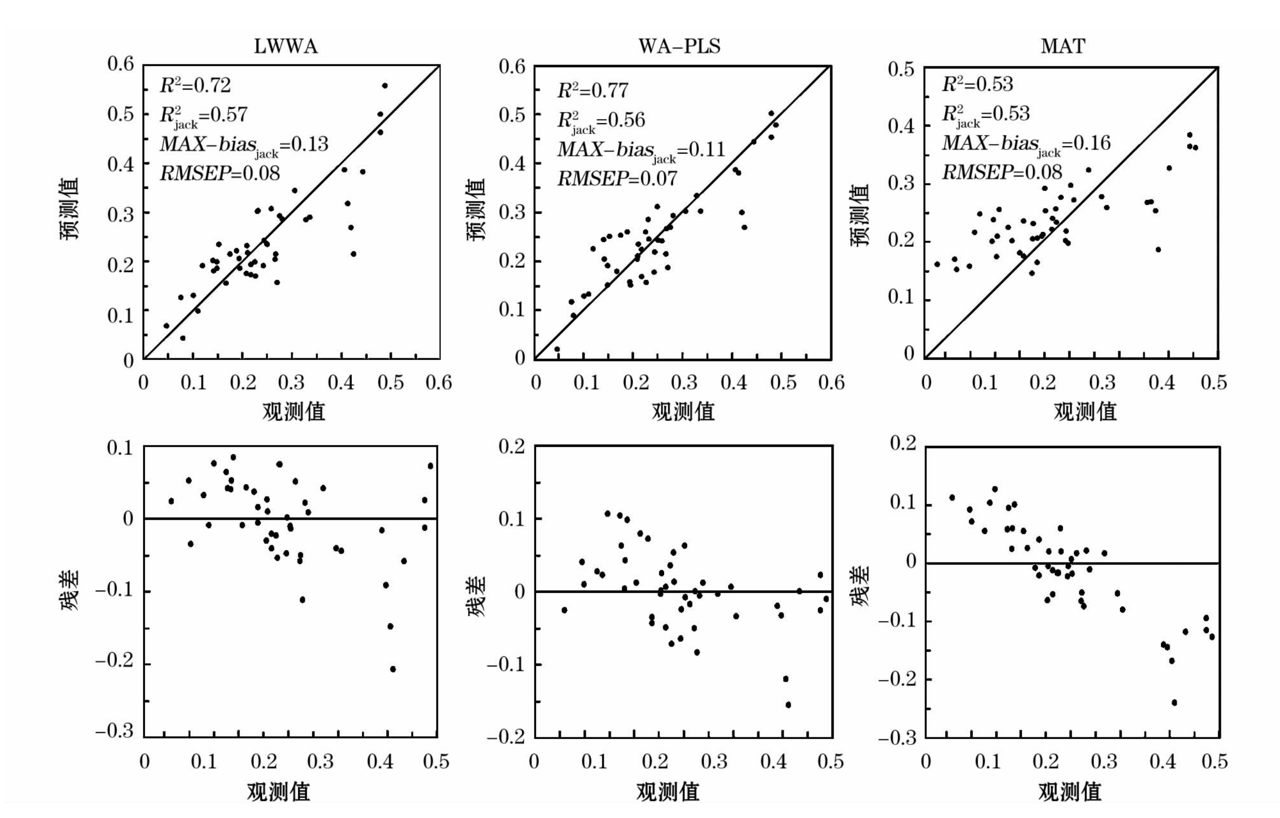


图4　3种模型(LWWA、WA-PLS、MAT)*NDVI*观测值与预测值散点图及残差分布

Fig. 4　Scatter plots and residual plots between the observed values and predicted values of the *NDVI* of the three models (LWWA, WA-PLS, MAT)

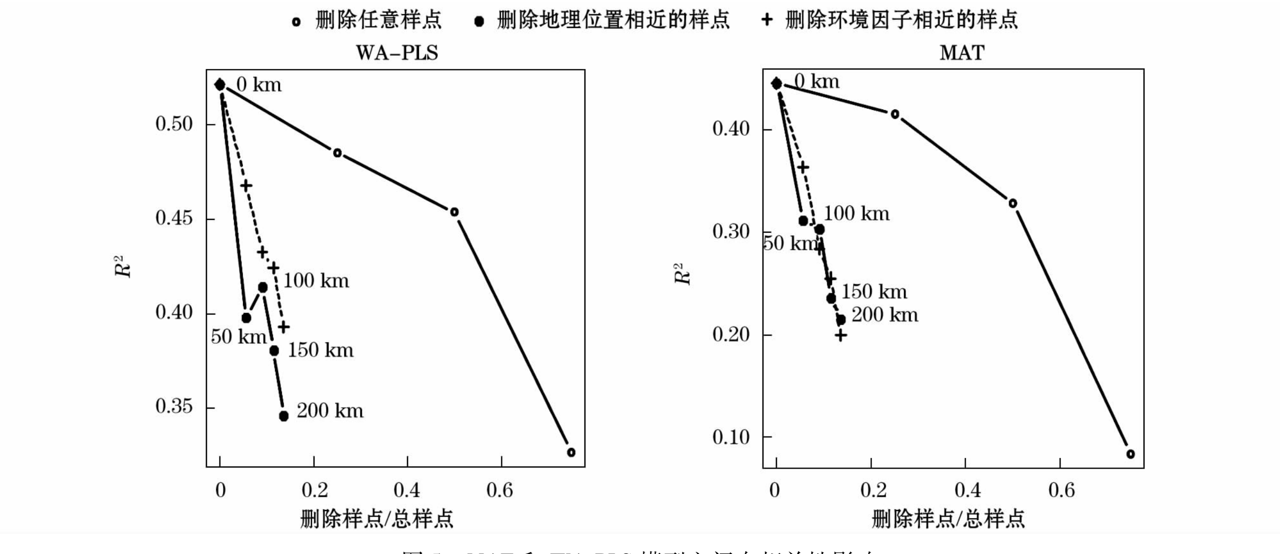


图5　MAT和WA-PLS模型空间自相关性影响

Fig. 5　Effect on function R^2 during cross-validation for WA-PLS and MAT

4　讨论

4.1　孢粉—*NDVI*转换函数(LWWA_Inv)可靠性比较

为进一步评价本研究基于LWWA_Inv方法的孢粉—*NDVI*转换函数的可靠性,本文将其与前人建立的类似转换函数的表现能力进行了比较。本研究重建因子为植被覆盖变化(*NDVI*),因此选取的主要比较对象为亚洲大陆建立的孢粉—植被覆盖转换函数[4-7]。结果如下(表5),本文*NDVI*重建结果与LIU等[5]、TIAN等[6]、HERZSUUH等[4]以及TARASOV等[7]孢粉—植被覆盖转换函数相比,R^2值较高

(R^2 =0.72),仅略低于 TARASOV[7] 的 R^2 值(R^2 = 0.77),表明本研究孢粉—*NDVI* 转换函数(LWWA_Inv)表现良好,具有一定的可靠性。综上,本研究基于内蒙古高原等地湖泊中心表层沉积物孢粉建立的孢粉—*NDVI* 转换函数(LWWA_Inv)可靠性较强,具有一定的应用潜力。

表 5　不同转换函数模型预测能力比较

Tab. 5　Comparison between different transfer functions

研究成果	研究区域	环境因子	方法	R^2	*RMSEP*
LIU 等[5]	中国北方	*NDVI*	ANN	0.62	/
TIAN 等[6]	东亚大陆	总林覆盖	MAT	0.66	9.18
HERZSUUH 等[4]	青藏高原	*LAI*	WA-PLS	0.5	0.24
TARASOV 等[7]	亚洲北方	总林覆盖	BMA	0.77	11.69
本研究	内蒙古高原	*NDVI*	LWWA_Inv	0.72	0.08

注:*NDVI* 为植被覆盖指数;*LAI* 为叶面积指数;ANN 为人工神经网络法;BMA 为最佳类比法

4.2　孢粉—*NDVI* 转换函数的应用

为评价孢粉—*NDVI* 转换函数的应用潜力,本文将 LWWA_Inv 法建立的孢粉—*NDVI* 转换函数应用到本课题组内蒙古中部辉腾锡勒地区全新世孢粉序列(HTL)[11],重建了其 14 300 ~4 800 cal. a BP 期间的植被覆盖变化,并将其与 HTL 孔的岩性、烧失量、乔木孢粉含量以及主要植被类型的孢粉群区化指数进行对比,验证本文孢粉—*NDVI* 转换函数的可靠性及应用潜力(图 6)。

HTL 孔孢粉重建的过去植被覆盖变化(*NDVI*)可分为 6 个阶段。阶段 1(548 ~648 cm,12 600 cal. a BP 以前),孢粉重建的 *NDVI* 值变化于 0.20 ~ 0.30之间,平均值约 0.26 左右,介于本研究草原(0.23)和草甸(0.37)之间。该时期乔木孢粉含量极低,森林孢粉群区化指数极低,草原群区化指数为峰值,有机质含量(LOI)处于最小值,区域植被可能为亚高山草原,与本文孢粉重建的 *NDVI* 指数相吻合。

阶段 2(470 ~ 548 cm,12 600 ~ 11 490 cal. a BP),*NDVI* 值增加,平均值为 0.30 左右。该时期尽管乔木孢粉含量及森林指数小幅增加,但增幅有限,不足以支持当地发育森林,相反,苔原指数显著增加,指示了亚高山莎草草甸(苔原)的植被景观,支持了孢粉重建的 *NDVI* 指数变化。

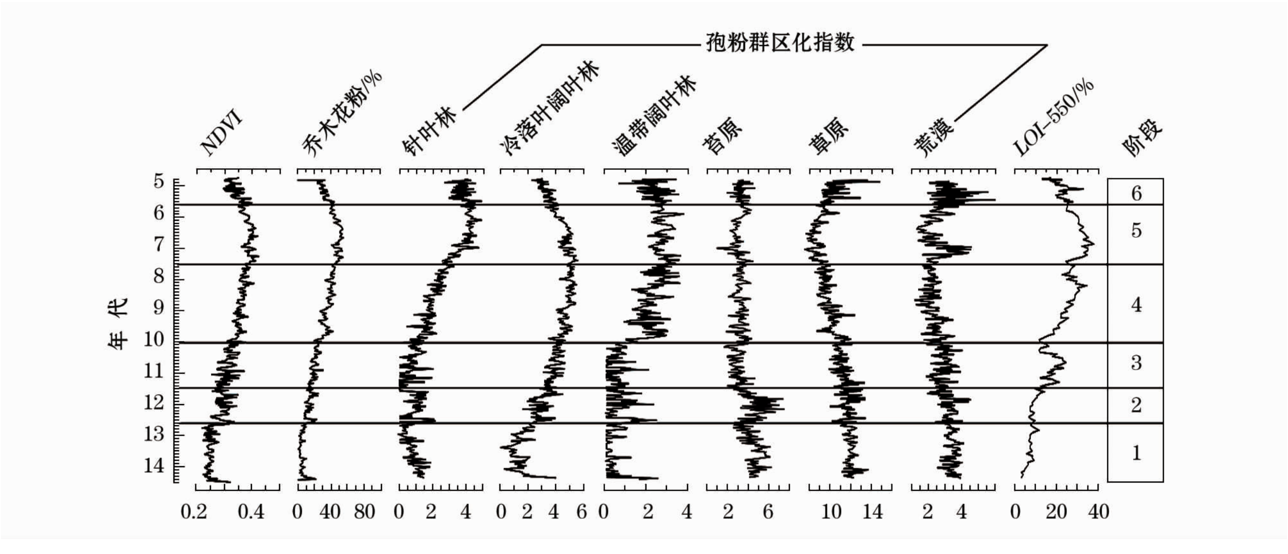


图 6　孢粉定量重建的辉腾锡勒地区 HTL 孔 *NDVI* 序列与其它代用指标序列的对比

Fig. 6　Comparison between our pollen reconstructed *NDVI* sequence and other proxies sequences of HTL profile in Huitengxile area

阶段 3(362 ~470 cm,11 490 ~10 010 cal. a BP)*NDVI* 值持续增加,至末期达 0.35 左右,平均值约为 0.32。该时期冷落叶阔叶林孢粉群区化指数持续增加,有机质含量也呈阶段性峰值,反映了植被持续改善的过程,至末期已形成桦木疏林草原植被景观,支持本文孢粉 NDVI 重建的结果。

阶段 4(218 ~ 362 cm,10 010 ~ 7 510 cal. a BP),孢粉重建的 *NDVI* 值继续增加,至末期达0.40,平均值为 0.35 左右。该时期乔木孢粉、针叶林指数、温带阔叶林指数以及有机质含量均呈现出逐渐增加的趋势,冷落叶阔叶林指数为峰值,反映区域植被结构发生改变,植被覆盖度不断增加,支持 *NDVI* 重建的结果。

阶段 5(130 ~218 cm,7 510 ~5 600 cal. a BP),

孢粉定量重建的 *NDVI* 指数为峰值,平均值达 0.40 左右,介于现代植被的森林草原和森林之间。孢粉指标也重建了森林草原的植被景观,该时期针叶林指数和温带阔叶落叶林指数均为峰值,草原指数为最低值,有机质含量也表现为峰值,反映了针阔混交森林草原的植被景观。

阶段 6(0 ~ 130 cm,5 600 ~ 4 900 cal. a BP),*NDVI* 值降低,至末期达 0.35 左右,与现代植被中森林草原的平均值相当,相比上一阶段森林减少,植被覆盖度降低。*NDVI* 值的变化得到了孢粉等指标的支持,该阶段乔木孢粉含量、有机质含量、针叶林指数、冷阔叶林指数以及温带阔叶林指数均显著下降,反映森林退化,但区域植被仍为稀疏森林草原。综上,HTL 孔孢粉序列重建的植被变化与本文孢粉重建的 *NDVI* 值变化基本一致,表明本文基于现代湖泊表层沉积物的孢粉—*NDVI* 转换函数具有良好的表现和应用潜力。

4.3 季风边缘区全新世植被覆盖变化的响应机制

将辉腾锡勒 HTL 孔重建的 *NDVI* 植被覆盖度变化,与区域内已发表的植被变化序列进行对比,获得了季风边缘区全新世植被变化趋势。然后,再将其与季风边缘区已有非孢粉指标重建的全新世区域降水序列、大尺度综合重建的温度序列进行对比,探讨影响或控制季风边缘区植被变化的主要气候因子,从而认识植被对气候变化的响应机制。因季风边缘区全新世气候变化幅度较大,造成区域内植被在森林草原和草原间变化频繁,因此本文选取用于对比的代表植被覆盖变化的指标为乔木花粉百分比含量(percentage of arboreal pollen taxa, AP%)[41-44]。再者,考虑到孢粉重建的气候因子与孢粉重建的植被覆盖基于同一套资料,具有相关性的特点,本文选择非孢粉重建的区域气候因子与孢粉重建的植被覆盖变化进行对比,揭示全新世植被对气候变化的响应机制。拟对比的气候因子序列包括北半球综合重建的温度曲线[45]、反映区域降水的青海湖全新世红度曲线[46]和陕北榆林黄土剖面的磁化率曲线[47]。

结果表明,季风边缘区全新世植被覆盖变化具有区域一致性(图 7)。在辉腾锡勒地区、岱海、公

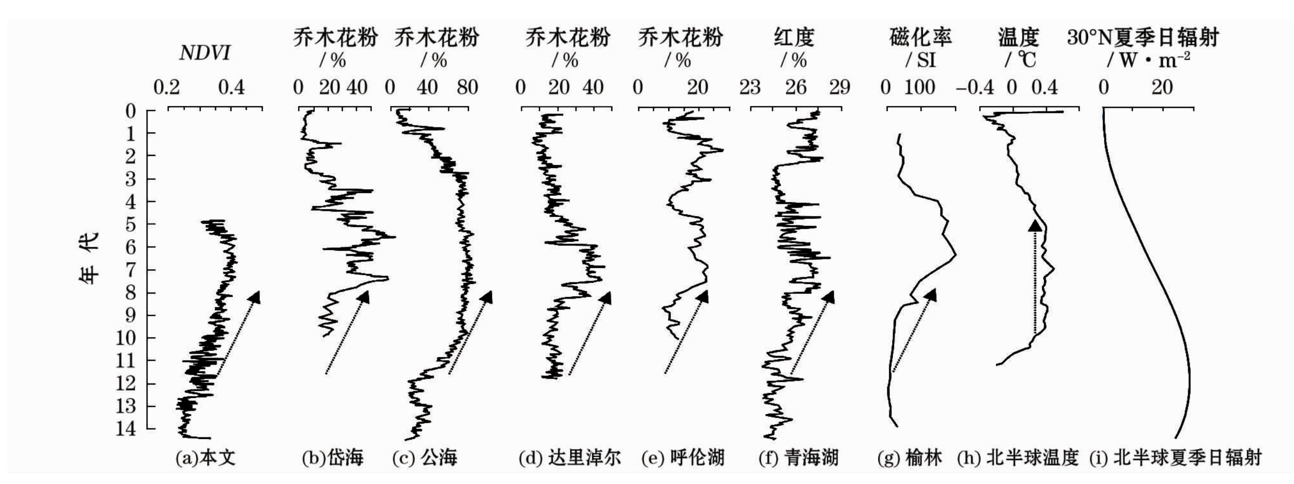


图 7 全新世北方季风边缘区植被覆盖变化对气候变化的响应机制对比

Fig. 7 Comparison between vegetation change in marginal monsoon area of northern China and non-pollen based climate sequences

海,达里淖尔和呼伦湖等地,植被变化表现出一致性,均表现出早全新世(8.0 ka BP 以前)的植被好转期、中全新世(8.0 ~ 5.5 ka BP)的植被最宜期和中晚全新世(5.5 ka BP 以后)的植被恶化期。上述植被覆盖变化与区域非孢粉指标重建的降水序列具有很好的对应关系,如图 7f 和图 7g 所示,青海湖红度指标和榆林黄土磁化率指标表现出了早全新世降水增多和中全新世降水最大特征。上述较好的对应关系表明全新世季风边缘区植被覆盖变化主要响应于年降水变化。相反,全新世季风边缘区植被覆盖变化模式与北半球中高纬度综合重建的温度曲线(图 7h)和北半球夏季日辐射变化曲线[48](图 7i)均呈不对应关系,前者差别主要在于早全新世,后者差别更大,表明全新世季风边缘区植被变化对年均温度变化响应不显著或者存在较大区间的滞后效应。

5 结 论

(1) 以内蒙古高原等地 46 个湖泊水库中心表层沉积物花粉组合与归一化植被指数(*NDVI*)为研

究对象，利用 WA-PLS、MAT 及 LWWA 等方法建立了孢粉—*NDVI* 转换函数。多种检验结果表明 MAT 和 WA-PLS 模型均受空间自相关性影响显著，LWWA 模型表现较优，可用于建立孢粉—*NDVI* 转换函数。

（2）应用本文转换函数重建的 HTL 区域全新世植被覆盖变化与孢粉重建的植被变化具有较好区域的一致性，印证了本文转换函数具有较强的可靠性和应用潜力。

（3）重建的 HTL 植被覆盖变化很好的指示了区域植被变化，当地植被及其植被覆盖对降水变化具有敏感的响应。

参考文献(References)

[1] 朱家文. IAP-DGVM 和 CoLM 的耦合与模拟以及植被对气候的反馈作用研究[D]. 北京：中国科学院大学，2014. [ZHU Jiawen. Studies of coupling IAP-DGVM with CoLM and the feedbacks of vegetation on climate[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]

[2] 沈晓燕，张宇，王少影，等. 若尔盖高原典型年份植被覆盖变化对 2010 年区域气候影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究，2015，20(4)：443 – 453. [SHEN Xiaoyan, ZHANG Yu, WANG Shaoying, et al. A numerical simulation of the impact of vegetation cover changes in the Zoigê Plateau in typical years on the regional climate in 2010[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(4): 443 – 453.]

[3] TARASOV P E, WEBB T, ANDREEV A A, et al. Present-day and mid-Holocene biomes reconstructed from pollen and plant macrofossil data from the former Soviet Union and Mongolia[J]. Journal of Biogeography, 1998, 25(6): 1029 – 1053.

[4] HERZSCHUH U, BIRKS H J B, JIAN N, et al. Holocene land-cover changes on the Tibetan Plateau[J]. Holocene, 2010, 20(1): 91 – 104.

[5] LIU G, YIN Y, LIU H Y, et al. Quantifying regional vegetation cover variability in North China during the Holocene: Implications for climate feedback[J]. Plos One, 2013, 8(8): e71681.

[6] TIAN F, CAO X Y, DALLMEYER A, et al. Quantitative woody cover reconstructions from eastern continental Asia of the last 22 kyr reveal strong regional peculiarities[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 137(137): 33 – 44.

[7] TARASOV P, WILLIAMS J W, ANDREEV A, et al. Satellite- and pollen-based quantitative woody cover reconstructions for Northern Asia: Verification and application to late-Quaternary pollen data[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2007, 264(1): 284 – 298.

[8] 刘立娜，王维，马玉贞，等. 呼伦湖表层沉积物花粉空间分布特征及影响因素探讨[J]. 沉积学报，2015，33(4)：744 – 753. [LIU Lina, WANG Wei, MA Yuzhen, et al. Spatial distribution characteristics and environmental influencing factors of pollen assemblage of lake surface sediments from Lake Hulun[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 744 – 753.]

[9] SUGITA S. Pollen representation of vegetation in quaternary sediments: Theory and method in patchy vegetation[J]. Journal of Ecology, 1994, 82(4): 881 – 897.

[10] COLIN P I. Pollen representation, source area, and basin size: Toward a unified theory of pollen analysis[J]. Quaternary Research, 1985, 23(1): 76 – 86.

[11] 李岩岩. 内蒙古辉腾锡勒地区 13980 ~ 4820 cal. yr BP 植被和气候变化研究[D]. 呼和浩特：内蒙古大学，2014. [LI Yanyan. Vegetation and climate changed during 13980 ~ 4820 cal. yr BP in Huitengxile area of Inner Mongolia, a multiple indicator investigation of lake sediment of HTL[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2014.]

[12] 秦伟，朱清科，张学霞，等. 植被覆盖度及其测算方法研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2006，34(9)：163 – 170. [QIN Wei, ZHU Qingke, ZHANG Xuexia, et al. Review of vegetation covering and its measuring and calculating method[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(9): 163 – 170.]

[13] 周兆叶，储少林，王志伟，等. 基于 NDVI 的植被覆盖度的变化分析——以甘肃省张掖市甘州区为例[J]. 草业科学，2008，25(12)：23 – 29. [ZHOU Zhaoye, CHU Shaolin, WANG Zhiwei, et al. Analysis of vegetation coverage change based on NDVI: A case study in Ganzhou Area, Zhangye City, Gansu[J]. Prataculutral Science, 2008, 25(12): 23 – 29.]

[14] FANG J Y, PIAO S L, HE J S, MA W H. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999[J]. Science in China, 2004, 47(3): 229 – 240.

[15] LI Z T, KAFATOS M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(3): 239 – 247.

[16] CHOUDHURY B J, AHMED N U, IDSO S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(1): 1 – 17.

[17] GILLIES R R, KUSTAS W P, HUMES K S. A verification of the "triangle" method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface e[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145 – 3166.

[18] KOBAYASHI, HIDEKI, DENNIS G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(4): 519 – 525.

[19] CIHLAR J, LY H, LI Z Q, et al. Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies: Artifacts and corrections[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(1): 35 – 57.

[20] 耿丽英，马明国. 长时间序列 *NDVI* 数据重建方法比较研究进展[J]. 遥感技术与应用，2014，29(2)：362 – 368. [GENG Liying, MA Mingguo. Advance in method comparison of reconstructing remote sensing time series data sets[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 362 – 368.]

[21] 盛承禹. 中国气候总论[M]. 北京：科学出版社，1986. [SHENG Chengyu. China climate pandect[M]. Beijing: Science Press, 1986.]

[22] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集[M]. 北

京:科学出版社,2001. [Chinese Vegetation Map Editorial Committee of the Chinese Academy of Sciences. Chinese vegetation atlas[M]. Beijing:Science Press,2001.]

[23] WCS/CIESN. Last of the wild data version 2:Global human influence index(HII)[DB/OL]. New York:Wildlife Conservation Society (WCS) and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN). [2018-11-09]. http://sedac. ciesin. columbia. edu/data/set/wildareas-v2-human-nfluence-index-geographic.

[24] SANDERSON E W,LEVY M J A,REDFORD K H,et al. The human footprint and the last of the wild[J]. Bioscience,2002,52(10):891-904.

[25] LI J Y,ZHAO Y,XU Q H,et al. Human influence as a potential source of bias in pollen-based quantitative climate reconstructions[J]. Quaternary Science Reviews,2014,99:112-121.

[26] BROOKS S J. A 1000-year chironomid-based salinity reconstruction from varved sediments of Sugan Lake,Qaidam Basin,arid Northwest China,and its palaeoclimatic significance[J]. Chinese Science Bulletin,2009,54(20):3749-3759.

[27] ZHAO Y,YU Z C,CHEN F H,et al. Sensitive response of desert vegetation to moisture change based on a near-annual resolution pollen record from Gahai Lake in the Qaidam Basin,Northwest China[J]. Global & Planetary Change,2008,62(1):107-114.

[28] VIDAL G. A palynological preparation method[J]. Palynology,1988,12(1):215-220.

[29] 李文漪,肖尚明,刘光琇,等. 花粉分析指南[M]. 广西:广西人民出版社,1987. [LI Wenxi,XIAO Shangming,LIU Guanxiu,et al. Guide to pollen analysis[M]. Guangxi:Guangxi People Press,1987.]

[30] 宛涛,卫智军,杨静,等. 内蒙古草地现代植物花粉形态[M]. 北京:中国农业出版社,1999:1-135. [WAN Tao,WEI Zhijun,YANG Jing,et al. Flora of grassland modern pollen Inner Mongolia[M]. Beijing:China Agriculture Press,1999:1-135.]

[31] 王伏雄,钱南芬,张玉龙,等. 中国植物花粉形态[M]. 2 版. 北京:科学出版社,1995. [WANG Fuxiong,QIAN Nanfeng,ZHANG Yulong,et al. Pollen flora of China[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,1995.]

[32] 王亚军,马玉贞,鲁瑞洁,等. 祁连山东延余脉——兴隆山树木径向生长记录的公元 1845 年来夏季 NDVI 变化[J]. 地理研究,2016,35(4):653-663. [WANG Yajun,MA Yuzhen,LU Ruijie,et al. Summer *NDVI* variability recorded by tree radial growth in the Xinglong Mountain,the eastward extension of the Qilian Mountains,since 1845 AD[J]. Geographical Research,2016,35(4):653-663.]

[33] HILL M O,GAUCH H G. Detrended correspondence analysis:An improved ordination technique[J]. Vegetation,1980,42(1/3):47-58.

[34] JUGGINS S. C2 Version 1.5:Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation[M]. Newcastle upon Tyne:Newcastle University Press,2007.

[35] HALL P,WILSON S R. Two guidelines for bootstrap hypothesis testing[J]. Biometrics,1991,47(2):757-762.

[36] TELFORD R,BIRKS H. Evaluation of transfer functions in spatially structured environments[J]. Quaternary Science Reviews,2009,28(13):1309-1316.

[37] TELFORD R,TRACHSEL M. Palaeo Sig:Significance tests for palaeoenvironmental reconstructions,R package version 1.1-3[M]. Bergen:University of Bergen Press,2015.

[38] LEPS J,SMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. New York:Cambridge University Press,2003.

[39] JUGGINS S,BIRKS H J B. Quantitative environmental reconstructions from biological data[M]. Dordrecht:Springer Netherlands Press,2012.

[40] JUGGINS S. The European diatom database(EDDI):A new tool for palaeoenvironmental reconstruction[M]. Newcastle upon Tyne:Newcastle University Press,2001.

[41] CHEN F,XU Q,CHEN J,et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation[J]. Scientific Reports,2015,5(1):11186.

[42] WEN R L,XIAO J L,CHANG Z G,et al. Holocene climate changes in the mid-high-latitude-monsoon margin reflected by the pollen record from Hulun Lake,Northeastern Inner Mongolia[J]. Quaternary Research,2010,73(2):293-303.

[43] XIAO J L,XU Q H,NAKAMURA T,et al. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of North-Central China:A direct indication of the Asian monsoon climatic history[J]. Quaternary Science Reviews,2004,23(14):1669-1679.

[44] WEN R L,XIAO J L,FAN J W,et al. Pollen evidence for a mid-Holocene East Asian summer monsoon maximum in Northern China[J]. Quaternary Science Reviews,2017,17(6):29-35.

[45] MARCOTT S A,SHAKUN J D,CLARK P U,et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years[J]. Science,2013,339(6 124):1198-1201.

[46] JI J,SHEN J,BALSAM W,et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments[J]. Earth & Planetary Science Letters,2005,233(1):61-70.

[47] LU H Y,YI S W,LIU Z Y,et al. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 k. y. and potential CO_2 forcing[J]. Geology,2013,41(9):1023-1026.

[48] BERGER A,LOUTRE M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. Quaternary Science Reviews,1991,10:297-337.

Lake central surface sediment-based pollen-vegetation cover transfer functions and its application in Inner Mongolia Plateau and adjacent area

CHEN Dong-xue[1,2], WANG Wei[1,2], LIU Li-na[1,2], JIANG Ya-juan[1,2], LI Yan-yan[1,2], NIU Zhi-mei[1,2], MA Yu-zhen[3], HE Jiang[1,2]

(1 *College of Ecology and Environment*, *Inner Mongolia University*, *Hohhot* 010021, *Inner Mongolia*, *China*;
2 *Institute of Environmental Geology*, *Inner Mongolia University*, *Hohhot* 010021, *Inner Mongolia*, *China*;
3 *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster*, *Ministry of Education of China* & *State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*)

Abstract: Vegetation cover was an important factor in palaeo-climate simulation. The study of pollen-vegetation cover transfer function based on modern processes provides a way to reconstruct the past vegetation cover change by using pollen stratum data. The Inner Mongolia Plateau and its adjacent area, which is located at the marginal monsoon area of northern China and has a large climatic and vegetal gradient, provides us an ideal area to study the pollen-vegetation cover transfer functions. In this paper, we investigated pollen assemblages of lake central surface sediment from 46 lakes and reservoirs, and developed transfer functions between lake surface sediment pollen assemblage and Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) using three different methods which include weighted average partial least squares (WA-PLS), local weighted average method (LWWA) and modern analogue technique (MAT). We used leave-one-out cross-validation, bootstrapping and autocorrelation test to evaluate the performance of those three pollen-NDVI transfer functions and select the most reliable to reconstruct the Holocene vegetation cover history of Huitengxile Plateau of central Inner Mongolia. As results, the redundancy analysis (RDA) was conducted on the pollen data and environmental data according to the linear data type of the pollen data, as indicated by the gradient length (i. e., 2.047) of the detrended correspondence analysis (DCA). The RDA plot displays that the *NDVI* points to the positive of the first axis where forest and forest steppe sites clustered, and has smaller angles with the *Pinus* and *Betula* and larger angles with the desert pollen type such as *Nitraria*, *Ephedra* and Tamaricaeae, which suggested that the *NDVI* index was closely related to the spatial distribution of pollen and thus the pollen-*NDVI* transfer functions could be reliably developed. The leave-one-out cross-validation and the bootstrapping test showed that the LWWA_Inv ($R^2_{jack}=0.57$, $R^2_{boot}=0.57$) and WA-PLS-3 ($R^2_{jack}=0.56$, $R^2_{boot}=0.54$) models have better performance than the MAT ($R^2_{jack}=0.53$, $R^2_{boot}=0.58$) model. The autocorrelation test suggests that both MAT model and WA-PLS model are greatly affected by spatial autocorrelation, and thus not suitable to develop pollen-*NDVI* transfer function. Therefore, the LWWA Inv model is suitable to reconstruct the past vegetation cover history (*NDVI*) for its overall good performance, and was used to reconstructed the *NDVI* history of Huitengxile Plateau of Inner Mongolia by applying to a fossil pollen record of a lacustrine sections from a unnamed small crater lake. The comparison shows there are broad consistence between pollen reconstructed *NDVI* and other pollen-based vegetation (i. e., biome score in this paper), which further demonstrated the reliability of our pollen-*NDVI* transfer functions. Furthermore, we compared those regional vegetation evolution with those non-pollen based Holocene temperature and precipitation sequences. The result shows that the pollen-based vegetation sequences were correlated well with the non-pollen based precipitations but not correlated with regional temperature sequences, which possibly indicated the Holocene vegetation change was closely responded to precipitation but temperature in marginal monsoon area of northern China.

Key words: Inner Mongolia Plateau; lake surface sediment; pollen assemblage; vegetation coverage; *NDVI*; transfer function